

## DISAIN DAN ANALISA PEMBANGKITAN LISTRIK BERBAHAN BAKAR TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT

**Moch Zulfikar Eka Prayoga, Rinaldy Dalimi**

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia  
Kampus Baru UI, Depok, Jawa Barat – 16424  
[zulfikar.prayoga@gmail.com](mailto:zulfikar.prayoga@gmail.com)

### Abstrak

Studi ini, fokus membahas pemanfaatan energi yang berasal dari limbah Pabrik Kelapa Sawit (PKS) berupa Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) untuk menjadi bahan bakar pembangkit listrik tenaga biomasa sawit (selanjutnya disebut PLTBS) dengan kapasitas 1 x 5 MWe. Pembangkitan listrik dari TKKS, pada dasarnya merupakan proses pembakaran yang kemudian menghasilkan uap panas, sehingga menggerakkan turbin uap dan membangkitkan energi listrik. Sebelum dilakukan pembakaran, terlebih dahulu TKKS melalui dua skenario *pretreatment* guna mengurangi kandungan air (*moisture content*). Skenario pertama, TKKS dicacah menggunakan alat pencacah hingga mempunyai dimensi panjang sekitar 5 cm. Skenario kedua, TKKS setelah dicacah seperti skenario pertama, dilakukan pengeringan menggunakan peralatan pengering yang memanfaatkan udara panas dari pemanas listrik. Kedua skenario *pretreatment* menghasilkan penurunan kadar air dari 35%, menjadi 24,5% dan 20%, dengan hasil analisa nilai kalor 3.152 kcal/kg dan 4.185 kcal/kg untuk masing – masing skenario. Hasil dan analisa dari kedua skenario menunjukkan nilai efisiensi boiler 72,96%, energi pembangkitan yang dihasilkan 4.965,17 kcal/kWh, dan efisiensi pembangkit sebesar 17,32%. Perbedaan terdapat pada konsumsi pembakaran pada kedua skenario, yaitu masing-masing 7.587,41 kg/jam dan 5.715,19 kg/jam. Kesimpulan yang didapatkan pada studi ini adalah perbedaan nilai kalor tidak mempengaruhi unjuk kerja pembangkit dan energi yang dihasilkan. Namun, penggunaan TKKS dengan nilai kalor yang lebih tinggi, membutuhkan konsumsi pembakaran yang lebih sedikit daripada TKKS dengan nilai kalor yang rendah.

**Kata kunci:** TKKS, pembangkit listrik, nilai kalor, energi, pretreatment

### Abstract

This study focused on utilization energy of solid waste derived from palm oil mill which generate electricity using empty fruit bunch (EFB) called biomass solid waste fired power plant (PLTBS) with electricity production 1 x 5 MWe. PLTBS literally as a combustion process that generate superheated steam, then rotating steam turbine generator, so it could generate electricity. Before combusted, EFB through two pretreatment scenario to reduce moisture content. The first scenario, EFB are shredded until 5 cm length. Second scenario, after shredded, EFB was dried using drying equipment that utilizes hot air from electric heater. Both pretreatment scenario produce EFB with lower moisture content from 35% previously, become 24,5% and 20%, with gross calorific value 3.152 kcal/kg and 4.185 kcal/kg respectively. The results of analysis from both scenario, obtained boiler efficiency 72,96%, net plant heat rate 4.965, 17 kcal/kWh, and thermal efficiency 17,32%. On the other side, this study got result EFB consumption on both scenario was 7.587,41 kg/jam and 5.715.19 kg/jam respectively. The conclusion obtained in this study is the difference in calorific value does not affect the performance of the generator and the energy produced. However, consumption of EFB with higher heating values requires less combustion rather than EFB with lower heating value.

**Keywords :** EFB, power plant, heating value, energy, pretreatment

## PENDAHULUAN

Negara Indonesia memiliki luas area 1.912.862,2 km<sup>2</sup> dengan 16.056 pulau yang terbagi atas 34 provinsi. Dikenal dengan sebutan negara agraris dan kaya akan potensi Sumber Daya Alam, negara Indonesia menduduki peringkat pertama sebagai penghasil minyak kelapa sawit dunia (Varqa, 2017). Terbentang di lahan seluas 14.030.573 ha, perkebunan kelapa sawit dapat menghasilkan sebesar 37.812.628 ton minyak sawit pada akhir 2017. Dan jumlah produksi minyak kelapa sawit tersebut akan selalu terus ditingkatkan hingga 42 juta ton di akhir 2018 (Badan Pusat Statistik, 2018).

Dengan melimpahnya potensi dan kekayaan sawit Indonesia, bisa dimanfaatkan untuk menjadi sumber energi terbarukan yang murah dan mudah didapatkan. Khususnya sumber energi yang berhubungan dengan pembangkitan listrik. Hal ini mengingat potensi yang dimiliki oleh kelapa sawit sebagai bahan bakar pembangkit listrik, baik yang berasal dari produk utama maupun hasil samping, dengan cara pembakaran biomasa menjadi uap, maupun minyak kelapa sawit sebagai bahan bakar mesin diesel. Pada studi ini, dibahas mengenai penggunaan biomasa sawit yang berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebagai hasil samping menjadi bahan bakar pembangkit listrik tenaga uap biomasa.

Berdasarkan penelitian, dari tandan buah segar yang diolah pada Pabrik Kelapa Sawit (PKS), dihasilkan limbah TKKS sebanyak 22% (Ohimain et al., 2013). Pemanfaatan limbah TKKS sering dilakukan dengan cara diolah menjadi pupuk kompos (Hatta et al., 2014). Hal ini dilakukan karena TKKS mempunyai kandungan unsur hara (N, P, K, Mg, dan Ca) yang bermanfaat untuk meningkatkan produktivitas tanaman kelapa sawit (Crawford, 2003). Selain unsur hara, TKKS mengandung senyawa lignoselulistik yang memiliki nilai kalori sebesar 21 MJ/kg, sehingga sangat berpotensi untuk digunakan sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik di Pabrik Kelapa Sawit (PKS) (Paul et al., 2015). Namun dikarenakan TKKS memiliki kandungan air cukup besar sekitar 60% saat keluar dari PKS, sehingga dibutuhkan proses pengolahan untuk menurunkan kandungan air hingga 20% untuk meningkatkan proses pembakaran didalam boiler. Proses pengurangan kandungan air dapat dilakukan

dengan beberapa rangkaian proses mulai dari *hydrothermal*, *mechanical dewatering*, dan *thermal drying* dihasilkan *solid fuel* dengan kandungan air pada kondisi 20% (Zhao et al., 2014). Namun, pada studi ini, proses penurunan kandungan air menggunakan metode pengeringan memanfaatkan udara panas melalui pemanas listrik.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui pemanfaatan biomasa sawit untuk menghasilkan energi listrik. Diantaranya dilakukan oleh Shafie *et al.* (2012) yang mengkaji proses pembangkitan listrik yang berasal dari semua jenis limbah biomasa tanaman, antara lain limbah perkebunan karet, sawit, cocoa, dan tebu. Hasil kajian yang didapat oleh Shafie *et al.* (2012) membuktikan bahwa limbah biomasa yang memiliki potensi paling besar dalam menghasilkan listrik berasal dari TKKS (Shafie et al., 2012). Kemudian, Ruiz *et al.* (2013) dalam penelitian yang dilakukan untuk mengetahui penggunaan teknologi gasifikasi biomasa. Beberapa hasil diketahui dari penelitian Ruiz *et al.* (2013) yaitu untuk menghilangkan kandungan air dan kalium yang tinggi dari TKKS dapat dilakukan beberapa tahapan diantaranya pemanasan dan pengeringan, pirolisis, oksidasi, dan gasifikasi (Ruiz et al., 2013). Penelitian yang dilakukan oleh Aziz *et al.* (2017) mengenai pembuatan disain proses pembangkit listrik menggunakan perpaduan TKKS dan *Palm Oil Mill Effluent* (POME) berbasis sistem kogenerasi menghasilkan efisiensi pembangkit listrik sebesar 30,4% pada suhu kerja 1000<sup>o</sup> C (Aziz et al., 2017).

Beberapa studi lain membahas metode *pretreatment* yang dilakukan kepada TKKS sebelum dijadikan bahan bakar. Diantaranya TKKS yang digunakan sebagai bahan bakar pengganti ethanol memanfaatkan hidrolisa enzim untuk meningkatkan kandungan glukosa, dimana studi tersebut mendapatkan efisiensi sebesar 20% dengan peningkatan kandungan selulosa menjadi 10% lebih tinggi dari semula (Tan et al., 2013). Kemudian, TKKS yang dicacah dan ditekan secara bertahap masih menghasilkan minyak sawit sebanyak 1,6% dari massa bahan itu sendiri (Baharuddin et al., 2011). Sehingga dari beberapa studi yang telah dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa TKKS masih menyimpan banyak potensi selulosa yang dapat digunakan baik untuk pembakaran pada pembangkit listrik maupun

pengambilan minyak sawit itu sendiri (Abdullah et al., 2011).

Tujuan dilakukan studi ini adalah untuk merekayasa disain Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batubara menjadi Pembangkit Listrik berbahan bakar Tandan Kosong Kelapa Sawit (selanjutnya disebut Pembangkit Listrik Tenaga Biomasa Sawit / PLTBS) dengan kapasitas 1 x 5 MWe. Banyak studi lain hanya sebatas pengolahan TKKS agar kandungan air dan kalium berkurang, agar layak dan handal ketika digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik. Namun, pada studi ini menggunakan dua skenario *pretreatment* untuk mengurangi kandungan air dan abu, kemudian melakukan pengujian laboratorium untuk mendapatkan nilai kalor, selanjutnya dilakukan implementasi dan analisa disain PLTBS yang telah dibuat.

Pembuatan disain dan analisa menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel. Hasil simulasi menunjukkan bahwa TKKS dengan skenario *pretreatment* dicacah dan dikeringkan memiliki nilai kalor lebih tinggi, serta pembangkit dengan efisiensi boiler yang tinggi. Hasil akhir yang didapat pada studi ini adalah, TKKS direkomendasikan untuk di cacah dan dikeringkan terlebih dahulu sebelum digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik.

## METODE

Pada studi ini, terdapat beberapa tahapan metode yang dilakukan, yang dimulai dari pengumpulan bahan baku TKKS, pembuatan disain pembangkit listrik, selanjutnya melakukan simulasi dan analisa menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel, dimana formulasi perhitungan yang digunakan mengacu pada prinsip kesetimbangan massa dan energi.

Bahan baku TKKS didapatkan dari PKS di Kabupaten Rokan Hulu, Kabupaten Riau dengan kapasitas olah sebesar 60 ton Tandan Buah Segar (TBS) per jam. Kemudian TKKS dilakukan dua skenario *pretreatment*, yaitu skenario pertama TKKS dicacah menggunakan mesin pencacah hingga berukuran panjang kira – kira 5cm. Untuk skenario kedua, selain TKKS dicacah hingga berukuran 5cm, dilakukan pengeringan menggunakan mesin pengering hingga kadar air berada pada angka 30%. Untuk lebih jelas, dapat dilihat pada Gambar 1.

Pada Tabel 1, terdapat tipe karakteristik dari TKKS yang merupakan hasil pengujian laboratorium. Nilai HHV (*Higher Heating*

*Value*) untuk TKKS yang akan dilakukan analisa dan simulasi disain adalah 3.152 kcal/kg dan 4.185 kcal/kg untuk masing – masing skenario. Perolehan nilai HHV TKKS tidak jauh berbeda dengan referensi penelitian sebelumnya sebesar 13 – 18 MJ/kg (Abdullah et al., 2010; Sulaiman & Abdullah, 2011). Beberapa faktor penyebab rendahnya nilai HHV TKKS adalah tingginya kandungan oksigen, rendahnya kadar karbon tetap, dan juga rendahnya kandungan lignin yang diakibatkan oleh adanya kandungan air yang tinggi.

Gambar 2 terdapat kurva yang menunjukkan perubahan kandungan unsur berdasarkan hasil pengujian laboratorium. Terdapat unsur yang meningkat kandungannya, yaitu unsur karbon (ditandai garis warna hijau), dan *volatile matter* (ditandai garis biru tua). Terdapat pula penurunan kandungan unsur TKKS, diantaranya kadar air (ditandai garis biru muda), kadar sulfur (ditandai garis coklat tua), kadar hidrogen (ditandai garis ungu), dan unsur lain yang memiliki kuantitas sangat kecil.

Perlakuan *pretreatment* terhadap sifat fisis TKKS, menyebabkan perubahan unsur kimiawi. Hal ini berdampak pada proses pembakaran yang terjadi pada boiler. Diantaranya kenaikan nilai efisiensi yang disebabkan karena penurunan kandungan air (Kumar et al., 2014). Selain itu, penurunan kandungan air dapat meningkatkan jumlah *combustible gas* (CO, CH<sub>4</sub>, dan H<sub>2</sub>) yang termasuk dalam *volatile matter* (Pradhan, 2015).

Gambar 3 menunjukkan disain dia-gram alir yang digunakan dalam studi ini. Acuan disain yang digunakan berdasarkan pada disain pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Bedanya terletak pada bahan bakar dan perlakuan *pretreatment* sebelum dibakar didalam boiler. Berdasarkan buku *Power Plant Engineering*, konsep mendasar yang terdapat di suatu pembangkitan listrik adalah sistem pembakaran di dalam boiler. Sistem tersebut melepaskan energi yang diubah menjadi uap panas, selanjutnya uap tersebut menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik. Permasalahannya, tidak semua energi yang berupa uap panas tersebut dapat diserap oleh turbin, sehingga membutuhkan proses lain untuk memanfaatkan energi berlebih tersebut. Diantaranya proses pertukaran panas, *preheating*, dan *steam recovery* (Stallard & Jonas, 1996).

Tabel 1. Karakteristik TKKS

Komponen	Raw material	Skenario – 1	Skenario – 2	Metode Analisa
<b><u>Analisa proksimat (wt%)</u></b>				
Kadar air	35	24,5	20	ASTM E871
Kadar abu	1,6	1,6	2,12	ASTM D1102
Karbon tetap	49,6	33,7	44,64	ASTM E872
Kadar sulfur	0,1	0,09	0,12	ASTM E775
Volatile matter	13,8	40,2	53,25	ASTM E897
<b><u>Analisa ultimat (wt%)</u></b>				
C	24	56,18	60,41	ASTM E777
H	6,26	3,41	3,52	ASTM E777
S	0,1	0,09	0,12	ASTM E775
N	0,98	1,18	1,56	ASTM E778
O	32,06	13,04	12,27	ASTM E935
<b><u>Nilai kalor (HHV, kcal/kg)</u></b>				
Hasil pengukuran	2.718	3.152	4.185	Bomb Calorimeter



(a)

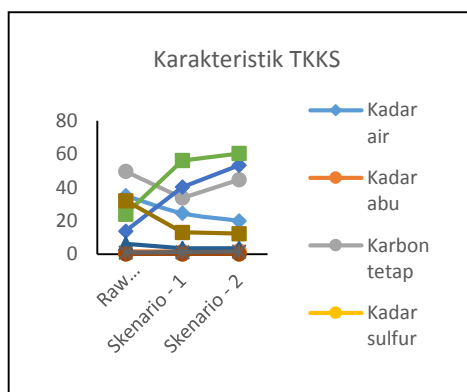


(b)



(c)

Gambar 1. (a) Limbah TKKS hasil pengolahan dari PKS; (b) TKKS skenario ke – 1 setelah dicacah; (c) TKKS skenario ke – 2 setelah di cacah dan dikeringkan



Gambar 2. Kurva perbandingan perubahan unsur TKKS

Perancangan disain PLTBS menggunakan peralatan-peralatan yang di-klasifikasikan kedalam dua sistem, yaitu sis-tem utama dan sistem pembantu (*Balance of Plant*).

#### 1. Sistem utama

Peralatan – peralatan yang termasuk dalam kategori sistem utama, antara lain sebagai berikut:

##### a. Boiler uap

Merupakan peralatan utama yang menghasilkan energi panas dari TKKS menjadi uap sehingga dapat digunakan untuk keseluruhan proses pembangkit listrik. Adapun spesifikasi boiler pada perancangan disain PLTBS terdapat pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi boiler uap

Deskripsi	Spesifikasi
Tipe	: Stoker dengan sistem <i>travelling grate</i>
Tekanan uap	: 53,54 kg/cm <sup>2</sup>
Temperatur uap	: 454,5 °C
Laju alir uap	: 25.000 kg/jam

Bahan bakar : Tandan kosong  
kelapa sawit (TKKS)  
Efisiensi : 73%

- b. Turbin uap  
Merupakan peralatan berputar saat terkena uap panas dari boiler, yang kemudian putaran tersebut menggerakkan generator listrik, sehingga dapat menghasilkan listrik.

Tabel 3. Spesifikasi turbin uap

Deskripsi	Spesifikasi
Tipe	: Horizontal, Condensing dengan <i>single casing</i>
Daya keluaran	: 6 MW
Kecepatan putaran	: 1.500 rpm
Efisiensi	: 95%
Deskripsi	Spesifikasi
Uap masuk	
Tekanan	: 51 kg/cm <sup>2</sup>
Temperatur	: 450 °C
Uap ekstraksi	
Tekanan	: 2,14 kg/cm <sup>2</sup>
Temperatur	: 174 °C
Uap exhaust	
Tekanan	: 75 kg/cm <sup>2</sup>
Temperatur	: 45,8 °C
Laju alir uap	
Inlet	: 25.000 kg/jam
Ekstraksi	: 1.730 kg/jam
Outlet	: 22.990 kg/jam

- c. Generator listrik  
Merupakan peralatan yang mengubah energi gerak (putaran) menjadi energi listrik. Dimana pada PLTBS, generator dan turbin saling terhubung dalam satu poros. Sehingga spesifikasi putaran turbin harus disesuaikan dengan putaran generator.

Tabel 4. Spesifikasi generator listrik

Deskripsi	Spesifikasi
Daya keluaran	: 5.800 kW (7.250 MVA)
Kecepatan putaran	: 1500 rpm
Phase	: 3 phase
Pole	: 4 pole ( 3P1N)
Tegangan keluaran	: 20.000 Volt
Frekuensi	: 50Hz
Efisiensi	: 96,8%

- d. Sistem rekoveri air kondensat  
Sistem rekoveri air kondensat biasa dikenal dengan kondenser. Dimana pada kondenser terdapat masukan berupa uap panas yang tidak terpakai setelah turbin uap yang kemudian dilakukan pendinginan untuk merekoveri air menggunakan sistem penukar panas. Spesifikasi disain kondenser harus disesuaikan dengan turbin uap agar mampu menampung keluaran uap panas kemudian dilakukan rekoveri sehingga air dapat digunakan untuk proses kembali.

Tabel 5. Spesifikasi kondenser

Deskripsi	Spesifikasi
Tekanan masukan	: 0,102 kg/cm <sup>2</sup>
Temperatur masukan	: 45,82 °C
Laju alir uap	: 22.990 kg/jam
Sistem pendingin	
Tekanan masukan	: 1,03 kg/cm <sup>2</sup>
Temperatur masukan	: 31 °C
Laju alir air	: 1.315,5 ton/jam

2. Sistem pembantu  
Peralatan – peralatan yang termasuk dalam kategori sistem pembantu, antara lain sebagai berikut:  
a. Deaerator  
Merupakan peralatan pemanas tipe kontak langsung yang memiliki fungsi memanaskan kembali air kondensat sekaligus menghilangkan gas terlarut (O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub>). Media pemanas diambil dari uap ekstraksi flash tank dan sisa uap GVC (U.S. Departement of Energy, 2012).

Tabel 6. Spesifikasi deaerator

Deskripsi	Spesifikasi
Tekanan	: 2,14 kg/cm <sup>2</sup>
Temperatur	: 174 °C
Laju alir uap	: 1.730 kg/jam
Enthalpy	: 672,8 kcal/kg

## b. Flash tank

Merupakan peralatan yang digunakan untuk mengamankan boiler saat mengeluarkan uap panas pada fase saturasi dengan tekanan dan temperatur tertentu. Sehingga pada saat boiler menyalurkan uap panas, terjadi penurunan temperatur secara tiba – tiba, dan terjadi pelepasan energi dalam bentuk uap di sisi kondensat. Guna menjaga kestabilan tekanan dan temperatur dalam boiler, maka diterapkan penggunaan flash tank. Operasional flash tank diset pada kondisi tekanan kondensate 2 atm, dan di sisi exhaust uap yang masih bertekanan digunakan untuk membantu pemanasan deaerator.

## c. GVC

Atau *Glend Vent Condenser* merupakan peralatan yang digunakan untuk menyuplik uap yang terjebak pada bagian kondensat agar dapat digunakan untuk proses pemanasan yang lain. Uap tersebut kemudian dialirkan menuju ke deaerator guna membantu proses deaerasi air baku yang akan digunakan kembali di dalam boiler.

## d. CEP

Atau *Condensate Extraction Pump* merupakan peralatan yang digunakan untuk menyalurkan air kondensasi dari kondenser dan turbin yang akan dipergunakan sebagai air baku boiler.

## e. BFWP

Atau *Boiler Feed Water Pump* merupakan peralatan yang digunakan untuk menyalurkan air baku menuju boiler, guna diubah menjadi *superheated steam*. Air yang disalurkan melalui BFWP sebelumnya telah dilakukan pemanasan

awal hingga temperatur saturasi dan bertekanan sesuai unjuk kerja boiler.

Perhitungan neraca kesetimbangan massa dan energi mengacu pada buku *Perry's Chemical Engineering Handbook 7<sup>th</sup> Edition* dengan beberapa penyesuaian untuk TKKS. Beberapa penyesuaian tersebut adalah perhitungan unjuk kerja boiler menggunakan metode Btu dan menerapkan sorbent (Perry et al., 1997).

Dalam penentuan analisa nilai kalor TKKS, acuan yang digunakan oleh analis laboratorium adalah menggunakan alat *bomb calorimeter* seperti yang tercantum pada standar ASTM D5865, dengan perhitungan HHV memakai formula Dulong (Kawecki, 2008).

$$HHV = 0,3941 C + 1,1783 H + 0,1005 S - 0,1034 O - 0,0151 N - 0,021 A \quad (1)$$

Dimana C, H, S, O, N, dan A merupakan nilai dari unsur karbon, hidrogen, sulfur, oksigen, nitrogen, dan abu. Agar nilai kalor TKKS yang masih berupa HHV harus dikonversi menjadi LHV (*Lower Heating Value*) sehingga dapat dilakukan perhitungan efisiensi termal pembangkit (WBCSD Cement Sustainability Initiative (CSI), 2014). Dan nilai LHV ini yang akan mempengaruhi kinerja boiler sebagai peralatan utama pembakaran.

$$LHV = HHV - 0,212 H - 0,0245 MC - 0,008 O \quad (2)$$

Perhitungan efisiensi boiler, energi yang dihasilkan, dan efisiensi termal pembangkit menggunakan formula 3,4, dan 5 (Perry et al., 1997).

$$Efisiensi\ boiler = 100 - losses - boiler\ credit\ (dalam\ persen) \quad (3)$$

$$Energi\ yang\ dihasilkan = \frac{energi\ input\ steam\ generator}{(turbine\ power - inhouse\ power) \times boiler\ eff \times gen\ eff} \quad (4)$$

$$Efisiensi\ termal\ pembangkit = \frac{860 \times 4,1868}{energi\ yang\ dihasilkan} \times 100 \quad (5)$$

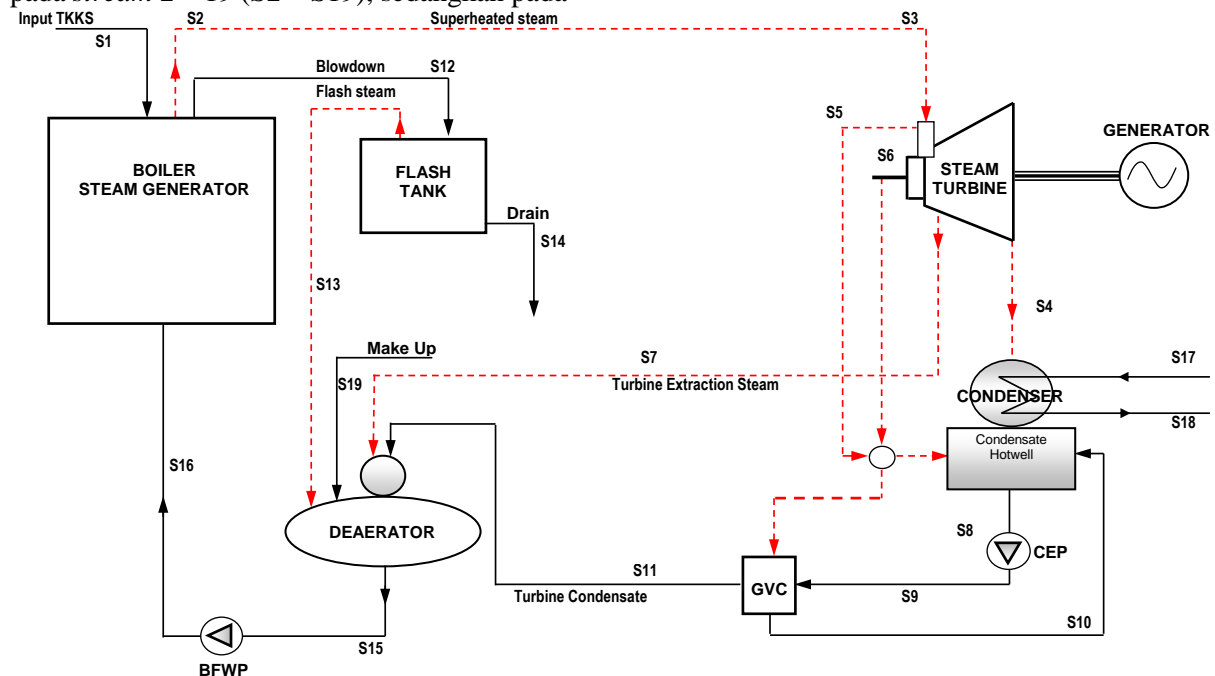
**HASIL DAN PEMBAHASAN****Skenario – 1**

Adapun masukan pada skenario – 1 berdasarkan Tabel 1, menghasilkan keseimbangan aliran massa dan energi yang terdapat pada Tabel 7. Proses perhitungan dan analisa menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel.

**Skenario – 2**

Adapun masukan pada skenario – 2 berdasarkan Tabel 1, menghasilkan keseimbangan aliran massa dan energi yang terdapat pada Tabel 8. Proses perhitungan dan analisa menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel.

Pada Tabel 7 dan Tabel 8 menunjukkan aliran keseimbangan massa dan energi fluida yang mengalir selama operasional PLTBS. Kedua skenario mendapatkan nilai yang sama pada *stream* 2 – 19 (S2 – S19), sedangkan pada



Gambar 3. Disain diagram alir PLTBS

Keterangan: Garis merah menunjukkan aliran uap panas, dan garis hitam menunjukkan aliran air  
Tabel 7. Karakteristik aliran fluida untuk masukan TKKS skenario *pretreatment* ke – 1

Stream	Flowrate (kg jam <sup>-1</sup> )	Press. (kg cm <sup>-2</sup> )	Temp (°C)	Enthalpy (kJ kg <sup>-1</sup> )	Stream	Flowrate (kg jam <sup>-1</sup> )	Press. (kg cm <sup>-2</sup> )	Temp. (°C)	Enthalpy (kJ kg <sup>-1</sup> )
S1	7.587,41	-	-	-	S11	23.270	6,89	54,13	227,15
S2	25.000	53,54	454,5	3.323,49	S12	1.351,98	54	267	1.169,37
S3	25.000	50,99	450	3.316,3	S13	407,2	2,07	120,66	2.707,15
S4	22.990	0,1	45,82	2.344,58	S14	944,78	2,07	120,66	506,58
S5	200	50,99	450	3.316,3	S15	26.351,98	1,3	103,1	432,16
S6	80	28,56	231,18	2.806,59	S16	26.351,98	54,6	104,07	440,16

S7	1.730	2,14	174,03	2.817	S17	1.315.492,07	1,03	31	129,94
S8	23.270	1,28	45,43	190,32	S18	1.315.492,07	1,03	40	167,59
S9	23.270	7,66	45,55	191,37	S19	944,78	2,06	32	134,22
S10	280	1,7	47	196,91					

Tabel 8. Karakteristik aliran fluida untuk masukan TKKS skenario *pretreatment* ke – 2

Stream	Flowrate (kg jam <sup>-1</sup> )	Press (kg cm <sup>-2</sup> )	Temp (°C)	Enthalpy (kJ kg <sup>-1</sup> )	Stream	Flowrate (kg jam <sup>-1</sup> )	Press (kg cm <sup>-2</sup> )	Temp (°C)	Enthalpy (kJ kg <sup>-1</sup> )
S1	5.715,19	-	-	-	S11	23.270	6,89	54,13	227,15
S2	25.000	53,54	454,5	3.323,49	S12	1.351,98	54	267	1.169,37
S3	25.000	50,99	450	3.316,3	S13	407,2	2,07	120,66	2.707,15
S4	22.990	0,1	45,82	2.344,58	S14	944,78	2,07	120,66	506,58
S5	200	50,99	450	3.316,3	S15	26.351,98	1,3	103,1	432,16
S6	80	28,56	231,18	2.806,59	S16	26.351,98	54,6	104,07	440,16
S7	1.730	2,14	174,03	2.817	S17	1.315.492,07	1,03	31	129,94
S8	23.270	1,28	45,43	190,32	S18	1.315.492,07	1,03	40	167,59
S9	23.270	7,66	45,55	191,37	S19	944,78	2,06	32	134,22
S10	280	1,7	47	196,91					

## SIMPULAN DAN SARAN

Studi ini menghasilkan simpulan yaitu nilai kalor pada TKKS tidak mempengaruhi kinerja pembangkit listrik. Sehingga dengan nilai kalor yang rendah, biomassa dapat dimanfaatkan untuk menjadi bahan bakar yang kemudian dikonversi menjadi listrik sebagai energi final. Adapun yang mempengaruhi kinerja pembangkit adalah peralatan dan teknologi yang disesuaikan dengan bahan bakar yang digunakan.

Untuk selanjutnya, sebaiknya dilakukan studi yang menelaah *slagging* dan *fouling* yang mungkin terjadi pada boiler biomasa sawit, mengingat kandungan air yang masih cukup besar, dan kadar kalium yang berpotensi menghambat proses produksi uap boiler.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada rekan-rekan di Engineering Center-BPPT yang telah memberikan bantuan penelitian, sehingga dapat menghasilkan tulisan ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, N., Gerhauser, H., & Sulaiman, F. (2010). Fast pyrolysis of empty fruit bunches. *Fuel*, 89(8), 2166–2169. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.12.019>
- Abdullah, N., Sulaiman, F., & Gerhauser, H. (2011). Characterisation of Oil Palm Empty Fruit Bunches for Fuel Application. *Journal of Physical Science*,

22(1), 1–24.

- Aziz, M., Kurniawan, T., Oda, T., & Kashiwagi, T. (2017). Advanced power generation using biomass wastes from palm oil mills. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1378–1386. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.031>

- Badan Pusat Statistik. (2018). *Statistik Indonesia 2018*. (Subdirektorat Publikasi dan Kompilasi Statistik, Ed.) (2018th ed.). Jakarta: Badan Pusat Statistik. <https://doi.org/10.15713/ins.mmj.3>

- Baharuddin, A. S., Aini, N., Rahman, A., Shah, U. K., & Ali, M. (2011). Evaluation of pressed shredded empty fruit bunch ( EFB ) -palm oil mill effluent ( POME ) anaerobic sludge based compost using Fourier transform infrared ( FTIR ) and nuclear magnetic resonance ( NMR ) analysis. *African Journal of Biotechnology*, 10(41), 8082–8089. <https://doi.org/10.5897/AJB10.548>

- Classi, I., Coals, S., This, E. B. V., By-nc-nd, C. C., Global, I., & Outlook, I. E. (2016). Effect of the temperature of different combustion zones in the boiler grate on changes in physical and chemical parameters of bituminous coal and slags g. *Journal of Sustainable Mining*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2016.07.002>
- Crawford, J. . (2003). Composting of



- Agricultural Waste. in *Biotechnology Applications and Research*, 68–77.
- Hatta, M., Jafri, & Permana, D. (2014). Pemanfaatan tandan kosong sawit untuk pupuk organik pada intercropping kelapa sawit dan jagung. *Jurnal Pengkajian Dan Pengembangan Teknologi Pertanian*, 17(45), 27–35.
- Kawecki, D. (2008). Chapter 6 - Fuel Preparation. In B. G. Miller & D. A. Tillman (Eds.), *Combustion Engineering Issues for Solid Fuel Systems* (pp. 199–240). Burlington: Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373611-6.00006-9>
- Kumar, H., Baredar, P., Agrawal, P., & Soni. (2014). Effect of Moisture Content on Gasification Efficiency in Down Draft Gasifier. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 413(3), 411–413.
- Ohimain, E. I., Izah, S. C., & Obieze, F. A. U. (2013). Material-mass balance of smallholder oil palm processing in the Niger Delta, Nigeria. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 5(3), 289–294. <https://doi.org/10.19026/ajfst.5.3259>
- Paul, O. U., John, I. H., Ndubuisi, I., Peter, A., & Godspower, O. (2015). Calorific Value of Palm Oil Residues for Energy Utilisation. *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 4(4), 2277–5668. Retrieved from [https://ijeir.org/administrator/components/com\\_jresearch/files/publications/IJEIR\\_1657\\_Final.pdf](https://ijeir.org/administrator/components/com_jresearch/files/publications/IJEIR_1657_Final.pdf)
- Perry, S., Perry, R. H., Green, D. W., & Maloney, J. O. (1997). *PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK*. McGraw-Hill.
- Pradhan, U. (2015). *Physical treatments for reducing biomass ash and effect of ash content on pyrolysis products*. Auburn University.
- Ruiz, J. A., Juárez, M. C., Morales, M. P., Muñoz, P., & Mendiál, M. A. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.021>
- Shafie, S. M., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., & Ahmad-Yazid, A. (2012). A review on electricity generation based on biomass residue in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5879–5889. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.031>
- Stallard, G. S., & Jonas, T. S. (1996). Combustion Processes. In L. F. Drbal, P. G. Boston, & K. L. Westra (Eds.), *Power Plant Engineering* (pp. 165–184). Boston, MA: Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0427-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0427-2_6)
- Sulaiman, F., & Abdullah, N. (2011). Optimum conditions for maximising pyrolysis liquids of oil palm empty fruit bunches. *Energy*, 36(5), 2352–2359. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.067>
- Tan, L., Yu, Y., Li, X., Zhao, J., Qu, Y., Choo, Y. M., & Loh, S. K. (2013). Pretreatment of empty fruit bunch from oil palm for fuel ethanol production and proposed biorefinery process. *Bioresource Technology*, 135, 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.134>
- Taole, R. L., Falcon, R. M. S., & Bada, S. O. (2015). The impact of coal quality on the efficiency of a spreader stoker boiler. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(12), 1159–1165. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/V115n12a3>
- U.S. Departement of Energy. (2012). *Advanced Manufacturing Office*. Washington DC.
- Varqa, S. (2017). Essential Palm Oil Statistics 2017. *Palm Oil Analytics*.
- WBCSD Cement Sustainability Initiative (CSI). (2014). Lower and Higher Heating Values (LHV and HHV). Retrieved September 12, 2018, from [http://www.cement-co2-protocol.org/en/Content/Internet\\_Manual/tasks/lower\\_and\\_higher\\_heating\\_values.htm](http://www.cement-co2-protocol.org/en/Content/Internet_Manual/tasks/lower_and_higher_heating_values.htm)
- Zhao, P., Shen, Y., Ge, S., Chen, Z., & Yoshikawa, K. (2014). Clean solid biofuel production from high moisture content waste biomass employing hydrothermal treatment. *Applied Energy*, 131, 345–367. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.038>